

TSN 测试仪 3.0 设计方案 (版本 1.0)

OpenTSN

OpenTSN 开源项目组

2021 年 5 月

版本历史

版本	修订时间	修订内容	修订人	文件标识
1.0	2021.5	初版编制		TSN 测试仪 3.0

目录

1、概述	4
2、总体设计	4
2.1. 总体架构	4
2.2 帧的处理流程	7
2.2.1 时钟同步配置帧解析处理流程	7
2.2.2 测试参数配置帧解析处理流程	7
2.2.3 状态上报帧的处理流程	8
2.2.4 PTP 帧封装处理流程	9
2.2.5 PTP 封装帧解封装处理流程	9
2.2.6 测试报文发送处理流程	10
2.2.7 测试报文接收处理流程	11
附录 A 分组数据结构定义	11
附录 B TSMP 报文格式设计	13
附录 C 测试仪配置报文格式设计	14
附录 D 测试仪上报 Beacon 报文格式设计	18
附录 E 基于以太网连接的 FAST 分组传输格式	23
附录 F TSN 测试仪测试连接图	24
附录 G TSN 测试仪性能	25

1、概述

TSN 测试仪是应用于 TSN 网络之间的数据适配节点，主要功能是将应用数据按照流量传输需求以及 TSN 网络封装格式注入到 TSN 网络中进行数据传输，以及将从 TSN 网络接收的数据进行封装返回应用程序并进行相关性能统计。具体包括软件配置能力、IEEE 1588 时钟同步能力、在确定的时间点生成发送时间敏感流、时间感知整形 (TAS)、时间敏感流/非时间敏感流的并发、网络流量捕获与分析等。

2、总体设计

2.1. 总体架构

TSN 测试仪硬件逻辑总体架构框图如图 2-1 所示，根据 TSN 测试仪功能需求，对接口应用做了映射（分别用于控制、数据输出、数据输入、流量采样），详见表 2-1。

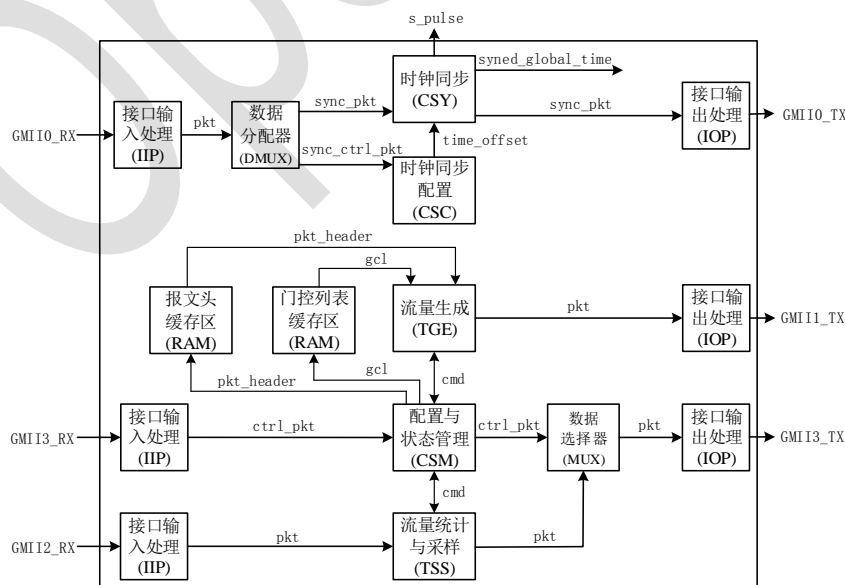


图 2-1 总体架构框图

表 2-1 GMII 接口说明

GMII 接口		说明
GMII0	RX	负责接收 PTP 报文、PTP 封装报文、配置报文（配置时间同步相关参数）。
	TX	负责发送 PTP 报文、PTP 封装报文
GMII1	RX	信号悬空
	TX	负责发送测试仪生成的测试报文
GMII2	RX	负责接收网络中返回的测试报文
	TX	信号输出为固定值 0
GMII3	RX	负责接收配置报文（配置测试报文的特征参数）。
	TX	负责发送采样报文，状态上报报文

IIP（Interface Input Process，接口输入处理）模块：负责丢弃接收报文的前导码、帧开始符和 CRC，将报文传输时钟域从 GMII 接收时钟域切换到架构内部时钟域，记录时间同步报文接收时间，转换报文位宽。

DMUX（Demultiplexer,数据分配器）模块：负责根据以太网类型对报文进行分派，将时间同步报文、时间同步封装报文分派给时间同步模块，配置报文（配置时间同步相关参数）分派给时钟同步配置模块。

CSY(Clock Synchronization，时间同步)模块：负责记录时间同步报文的接收时间戳、计算透明时钟并更新透明时钟域、将时间同步报文封装到 TSMP（Time Sensitive Management Protocol）帧中，以及将时间同步封装报文解封装为时间同步报文、记录时间同步报文的发送时间戳，以及根据接收到的本地时钟与主时钟的偏差值修正本地时钟。

CSC (Clock Synchronization Configure, 时钟同步配置) 模块: 负责解析配置报文 (配置时钟同步的相关参数), 完成对时钟同步相关参数的配置。

CSM(Configuration and State Management, 配置与状态管理) 模块: 负责解析配置报文 (配置测试报文的特征参数), 完成对本地寄存器和表的配置; 以及周期性上报本地的状态信息。

TGE(Traffic Generate, 流量生成)模块: 基于令牌桶机制、时间感知整形 (TAS) 来实现多条流的生成与发送, 其中用令牌桶机制来控制流量发送速率, 用时间感知整形来控制流量发送时刻。

TSS(Traffic Statistic and Sample, 流量统计与采样) 模块: 负责根据五元组匹配 (带掩码) 统计 TSN 测试仪接收的每条流量的数量以及总接收数量, 提取接收报文的五元组并存放在 metadata, 然后按一定的采样频率对接收的报文进行封装与采样。

MUX (Multiplexer,数据分配器) 模块: 负责对 NMAC 状态上报报文和采样的报文进行选择输出。

IOP (Interface Output Process, 接口输出处理) 模块: 负责实现报文位宽转换, 增添帧前导符、帧开始符和 CRC, 计算时间同步报文在测试仪中传输的透明时钟并更新透明时钟域, 将报文传输的时钟域从内部处理时钟域切换到外部 PHY 的时钟域。

2.2 帧的处理流程

2.2.1 时钟同步配置帧解析处理流程

时钟同步配置帧由 GMII0 接口输入，在 GMII3 接口输入处理模块先对帧进行跨时钟域（从 GMII 接收时钟域到 HCP 内部逻辑工作时钟域）转换，接下来将帧每拍数据的位宽由 8bit 转换为 134bit，并增加两拍 metadata，在第一拍 metadata 中携带帧长度和接口接收帧的时间戳，然后将帧输出给数据分配器模块。

数据分配器模块根据帧以太网类型为 0xff01 及其子类型为 0x02 判定该帧为时钟同步配置帧（配置时钟同步参数），然后将时钟同步配置帧分配给时钟同步配置模块。

时钟同步配置模块对接收的时钟同步配置帧进行解析，根据时钟同步配置帧中携带的配置数据个数以及配置基地址，将配置数据写入对应寄存器。

2.2.2 测试参数配置帧解析处理流程

测试参数配置帧由 GMII3 接口输入，在 GMII3 接口输入处理模块先对帧进行跨时钟域（从 GMII 接收时钟域到 HCP 内部逻辑工作时钟域）转换，接下来将帧每拍数据的位宽由 8bit 转换为 134bit，并增加两拍 metadata，在第一拍 metadata 中携带帧长度和接口接收帧的时间戳，然后将帧输出给数据分配器模块。

数据分配器模块根据帧以太网类型为 0xff01 及其子类型为 0x10

或 0x20 判定该帧为测试参数配置帧（配置测试报文的特征参数），然后将测试参数配置帧分配给配置与状态管理模块。

配置与状态管理模块对接收的测试参数配置帧进行解析，若帧以太网类型为 0xff01 及其子类型为 0x10，则该测试参数配置帧用以配置 8 种类型流量的报文头，并将该 8 种类型流量的报文头写入缓存区中进行缓存；若帧以太网类型为 0xff01 及其子类型为 0x20，则该测试参数配置帧用以配置门控列表、测试报文的长度和发送速率、需统计的流量五元组信息等。在测试参数配置帧配置完成后，配置与状态管理模块给出配置完成信号。

2.2.3 状态上报帧的处理流程

配置与状态管理模块每次接收到上报脉冲后会输出一个上报请求给数据选择器，当接收到数据选择器的响应后开始传输上报报文给数据选择器，上报本地状态（详见表 D-1），包括可配置寄存器、状态寄存器。

数据选择器检测到上报请求时，在没有报文传输时会传给配置与状态管理模块一个响应，接下来开始接收并传输配置与状态管理模块传来的报文给接口输出处理模块。

接口输出处理模块将测试报文的位宽由 134bit 转换为 8bit，以及将报文传输跨时钟域由测试仪内部逻辑工作时钟域切换到 GMII 发送时钟域，然后数据从 GMII3 接口输出。

2.2.4 PTP 帧封装处理流程

PTP 帧由 GMII0 接口输入，在接口输入处理模块先对帧进行跨时钟域（从 GMII 接收时钟域到主时钟内部逻辑工作时钟域）转换，接下来将帧每拍数据的位宽由 8bit 转换为 134bit 后，增加两拍 metadata，在第一拍 metadata 中携带帧长度和接口接收帧的时间戳，然后将帧输出给数据分配器模块。

数据分配器模块根据帧以太网类型为 0x98f7 判定该帧为 PTP 帧，然后分配给时钟同步模块。时钟同步模块将 PTP 报文到达本模块的时间戳减去 PTP 在接口记录的时间戳即得 PTP 报文在测试仪中传输的透明时钟，并将透明时钟累加到透明时钟域中，同时将 PTP 报文到达本模块的时间戳记录在 PTP 报文的 payload 中；将 PTP 报文封装到 TSMP 帧中后传输给接口输出处理模块。

接口输出处理模块将状态上报报文的位宽由 134bit 转换为 8bit，以及将报文传输跨时钟域由测试仪内部逻辑工作时钟域切换到 GMII 发送时钟域，然后数据从 GMII0 接口输出。

2.2.5 PTP 封装帧解封装处理流程

PTP 封装帧由 GMII0 接口输入，在接口输入处理模块先对帧进行跨时钟域（从 GMII 接收时钟域到主时钟内部逻辑工作时钟域）转换，接下来将帧每拍数据的位宽由 8bit 转换为 134bit 后，增加两拍 metadata，在第一拍 metadata 中携带帧长度和接口接收帧的时间戳，然后将帧输出给数据分配器模块。

数据分配器模块根据帧以太网类型为 0xff01 且子类型为 0x5 判定该帧为 PTP 封装帧，然后分配给时钟同步模块。时钟同步模块去掉 PTP 封装帧的 TSMP 以太网头，将 PTP 封装帧解封装为 PTP 帧，并且记录 PTP 帧输出本模块的时间戳并将其存放在 payload 中。

接口输出处理模块将 PTP 帧到达本模块的时间戳减去 PTP 帧从时钟同步模块输出的时间戳即得 PTP 报文在测试仪中传输的透明时钟，并将透明时钟累加到透明时钟域中，然后将 PTP 报文的位宽由 134bit 转换为 8bit，以及将报文传输跨时钟域由测试仪内部逻辑工作时钟域切换到 GMII 发送时钟域，然后数据从 GMII0 接口输出。

2.2.6 测试报文发送处理流程

当配置与状态管理模块完成了测试报文的配置且测试仪时钟已和网络时钟同步后，流量生成模块基于令牌桶机制来控制每条流量的发送速率，基于门控列表来控制流量的发送时刻；根据优先级调度策略，来对 8 条流量进行调度，并根据配置的每条流量的报文长度在报文头末尾填充相应数据 0，然后将报文输出给接口输出处理模块。在流量调度发送过程中，测试仪控制器可对 8 条流量的报文头进行更新，流量生成模块检测到报文头更新完成信号后，将调度发送更新后的报文头。

接口输出处理模块将测试报文的位宽由 134bit 转换为 8bit，以及将报文传输跨时钟域由测试仪内部逻辑工作时钟域切换到 GMII 发送时钟域，然后数据从 GMII1 接口输出。

2.2.7 测试报文接收处理流程

从网络中返回测试仪的测试报文由 GMII2 接口输入，在 GMII2 接口接收处理模块先对报文进行跨时钟域（从 GMII 接收时钟域到测试仪内部逻辑工作时钟域）转换，接下来将帧每拍数据的位宽由 8bit 转换为 134bit 后，增加两拍 metadata，在第一拍 metadata 中携带帧长度和接口接收帧的时间戳，然后将帧输出给流量统计与采样模块。

流量统计模块接收到测试报文，提取出报文的五元组信息，并与测试仪控制器配置的五元组进行匹配（带掩码），统计每条流量接收的报文个数；同时统计从 GMII2 接口接收的报文总数，并对接收到的报文进行封装，在报文封装时，会检测封装后的报文是否超过 1514B（不包括 4B 的 CRC），并将超出 1514B 的数据丢弃，以保证封装后报文长度不超过 1514B；然后按照配置的采样频率对接收的报文进行采样，将采样后的报文输出给数据选择器。

数据选择器先将采样报文写入 fifo 中进行缓存，在配置与状态管理模块无上报请求且无报文传输时，将 fifo 中的报文读出并输出给接口输出处理模块。

接口输出处理模块将测试报文的位宽由 134bit 转换为 8bit，以及将报文传输跨时钟域由测试仪内部逻辑工作时钟域切换到 GMII 发送时钟域，然后数据从 GMII3 接口输出。

附录 A 分组数据结构定义

测试仪 3.0 中分组包括 Metadata 头部及有效数据分组两部分，格

式如图 A-1 所示，Metadata 在分组的前 32 字节携带，每个分组在测试仪内部逻辑中的第 1 拍 16 字节为 Metadata0，第二拍数据为 Metadata1。

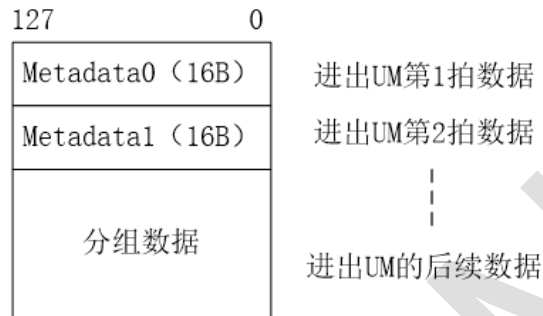


图 A-1 分组数据传输格式

分组的前两拍为接口输入处理模块添加的 32 字节的 metadata，两拍后的数据为有效分组数据。134 位的数据由 2 位的头尾标识，4 位无效字节数，128 位的有效数据组成。

其中，[133:132]位为报文数据的头尾标识，01 代表报文头部，11 代表报文中间数据，10 代表报文尾部；[131:128]位为 4 位的无效字节数，其中 0000 表示 16 个字节全部有效，0001 表示最低一个字节无效，最高 15 个字节有效，依次类推，1111 表示最低 15 个字节无效，最高一个字节有效。格式如图 A-2 所示。

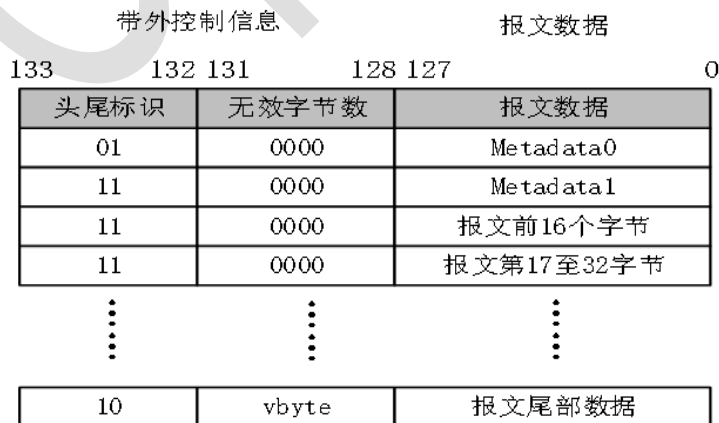


图 A-2 报文分组传输格式

附录 B TSMP 报文格式设计

TSMP（时间敏感管理协议）是 TSN 网络集中控制器进行网络拓扑探测、网络中节点配置以及报文封装的协议。

● TSMP 帧格式

TSMP 帧的格式设计如图 B-1 所示。

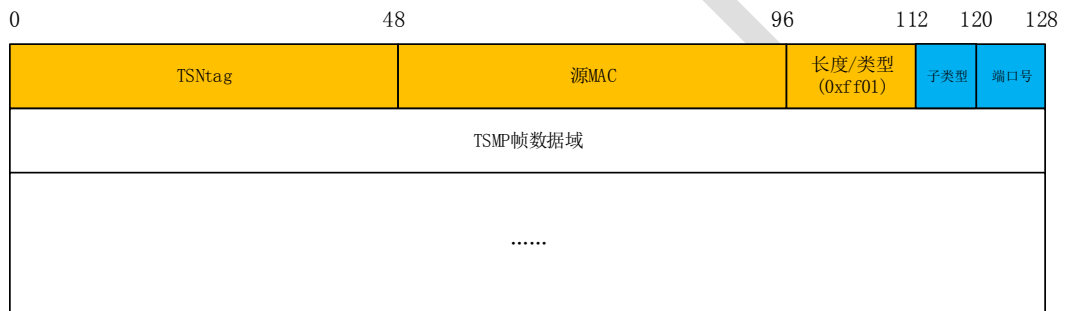


图 B-1 TSMP 帧格式

图中黄色字段和蓝色字段为 TSMP 报文头，其中黄色字段为 TSMP 报文以太网头；白色字段为 TSMP 报文数据域。TSMP 报文头中各字段的含义详见表 B-1，TSMP 报文类型详见表 B-2。

表 B-1 TSMP 报文头各字段的含义

字段	位宽	说明
TSNtag	48	TSMP 报文经映射所得的结果。
源 mac	48	暂未使用
长度/类型	16	TSMP 报文类型为 0xff01（自定义）
子类型	8	用来标识不同类型的 TSMP 报文，目前包含 6 种类型：ARP 封装报文、芯片上报 Beacon 报文、HCP 上报 Beacon 报文、测试仪上报 Beacon 报文、芯片配置报文、HCP 配置报文、测试仪配置报文、PTP 封装报文
端口号	8	报文在第一跳的输入端口号（由 HCP 填充该字段）或者报文在最后一跳的输出端口号（由集中式控制器填充该字段）

表 B-2 TSMP 报文类型

报文类型	子类型的值	含义
ARP 封装报文	8'h0	ARP 报文封装到 TSMP 报文中在网络中进行传输，将 ARP 报文完整地存放在 TSMP 数据域
芯片上报 Beacon 报文	8'h1	交换机、网卡上报到控制器的状态报文，将交换机、网卡的状态上报报文完整地存放在 TSMP 数据域
芯片配置报文	8'h2	控制器对交换机、网卡进行配置的报文，控制器将 NMAC 配置报文封装到 TSMP 报文中，其中 NMAC 配置报文完整地存放在 TSMP 数据域
HCP 配置报文	8'h3	控制器对 HCP 进行配置的报文；配置信息存放在 TSMP 数据域。
HCP 上报 Beacon 报文	8'h4	HCP 上报的状态信息存放在 TSMP 数据域
PTP 封装报文	8'h5	将 PTP 报文（sync 报文、delay_req 报文、delay_resp 报文）封装到 TSMP 报文中，其中 PTP 报文完整地存放在 TSMP 数据域
测试仪配置报文	8'h10	测试仪控制器对测试仪 8 条流量的报文头进行配置的报文，8 条流量的报文头信息存放在 TSMP 数据域
	8'h20	测试仪控制器对测试仪寄存器、门控列表进行配置的报文，寄存器、门控列表存放在 TSMP 数据域
测试仪上报 Beacon 报文	8'h30	测试仪上报的状态信息存放在 TSMP 数据域

附录 C 测试仪配置报文格式设计

本部分介绍测试仪配置报文（专指配置测试报文的特征参数）格式的详细设计。

为了方便测试仪控制器在测试过程中动态更新 8 种类型的报文头，将测试仪配置报文进一步细划为用于更新 8 种类型报文头的配置报文和用于更新门控列表、可配置寄存器的配置报文，这两种测试仪配置报文通过 TSMP 报文的子类型进行区分，详见表 B-2。

● 配置 8 种类型报文头的报文格式

在配置与状态管理模块接收到的配置 8 种类型报文头的报文格

式如图 C-1 所示，该配置报文的 TSMP 数据域划分如表 C-1 所示。

7bit	0	偏移量
FAST头		0~31
TSMP报文头		32~47
TSMP 数据域	FAST头	48~79
	8种类型 报文头	80~591

图 C-1 配置 8 种类型报文头的 TSMP 报文格式

表 C-1 配置 8 种类型报文头的 TSMP 报文数据域划分

模块	位置（拍）	字段	信号名	含义
/	4~5	[127:0]	-	FAST 头
报文头 缓存区	6~9	[127:0]	-	第 1 种类型报文头
	10~13	[127:0]	-	第 2 种类型报文头
	14~17	[127:0]	-	第 3 种类型报文头
	18~21	[127:0]	-	第 4 种类型报文头
	22~25	[127:0]	-	第 5 种类型报文头
	26~29	[127:0]	-	第 6 种类型报文头
	30~33	[127:0]	-	第 7 种类型报文头
	34~37	[127:0]	-	第 8 种类型报文头

● 配置门控列表和可配置寄存器的报文格式

在配置与状态管理模块接收到的配置门控列表和可配置寄存器的报文格式如图 C-2 所示，该配置报文的 TSMP 数据域划分如表 C-2 所示。

7bit	0	偏移量
FAST头		0~31
以太网帧头		32~63
TSMP数据域	FAST头	64~79
	门控列表	80~591
	可配置 寄存器	592~1439

图 C-2 配置门控列表和可配置寄存器的报文格式

表 C-2 配置门控列表和可配置寄存器的 TSMP 报文数据域划分

模块	位置 (拍)	字段	信号名	含义
/	4~5	[127:0]	-	FAST 头
门控 列表 缓存区	6~37	[127:0]	-	一个周期的门控列表，包含 16 个 slot 的 8 种类型报文的 门控状态
流量生 成模块	38	[32]	test_stop	测试结束信号
		[31:0]	gcl_time_slot_cycle	门控列表的一个 $\frac{\text{时间槽大小}}{8}$
	39	[95:80]	tb3_size	第 3 种类型报文对应的令牌 桶的桶深
		[79:64]	tb3_rate	每隔 1 个 slot 往第 3 种类型报 文对应的令牌桶中添加的令 牌数量
		[63:48]	tb2_size	第 2 种类型报文对应的令牌 桶的桶深
		[47:32]	tb2_rate	每隔 1 个 slot 往第 2 种类型报 文对应的令牌桶中添加的令 牌数量
		[31:16]	tb1_size	第 1 种类型报文对应的令牌 桶的桶深
		[15:0]	tb1_rate	每隔 1 个 slot 往第 1 种类型报 文对应的令牌桶中添加的令 牌数量
	40	[95:80]	tb6_size	第 6 种类型报文对应的令牌 桶的桶深
		[79:64]	tb6_rate	每隔 1 个 slot 往第 6 种类型报 文对应的令牌桶中添加的令 牌数量
		[63:48]	tb5_size	第 5 种类型报文对应的令牌 桶的桶深
		[47:32]	tb5_rate	每隔 1 个 slot 往第 5 种类型报 文对应的令牌桶中添加的令 牌数量
		[31:16]	tb4_size	第 4 种类型报文对应的令牌 桶的桶深
		[15:0]	tb4_rate	每隔 1 个 slot 往第 4 种类型报 文对应的令牌桶中添加的令 牌数量
	41	[63:48]	tb8_size	第 8 种类型报文对应的令牌 桶的桶深

模块	位置 (拍)	字段	信号名	含义
/	4~5	[127:0]	-	FAST 头
		[47:32]	tb8_rate	每隔 1 个 slot 往第 8 种类型报文对应的令牌桶中添加的令牌数量
		[31:16]	tb7_size	第 7 种类型报文对应的令牌桶的桶深
		[15:0]	tb7_rate	每隔 1 个 slot 往第 7 种类型报文对应的令牌桶中添加的令牌数量
	42	[127:112]	pkt_8_len	第 8 种类型报文的字节数(不包括 4B 的 CRC)
		[111:96]	pkt_7_len	第 7 种类型报文的字节数(不包括 4B 的 CRC)
		[95:80]	pkt_6_len	第 6 种类型报文的字节数(不包括 4B 的 CRC)
		[79:64]	pkt_5_len	第 5 种类型报文的字节数(不包括 4B 的 CRC)
		[63:48]	pkt_4_len	第 4 种类型报文的字节数(不包括 4B 的 CRC)
		[47:32]	pkt_3_len	第 3 种类型报文的字节数(不包括 4B 的 CRC)
		[31:16]	pkt_2_len	第 2 种类型报文的字节数(不包括 4B 的 CRC)
		[15:0]	pkt_1_len	第 1 种类型报文的字节数(不包括 4B 的 CRC)
	43	保留		
流量统计与采样模块	44	[103:0]	{src_ip_1,dst_ip_1, protocol_1,src_port_1 , dst_port_1}	第 1 种类型报文的五元组
	45	[103:0]	mask_1	第 1 种类型报文的五元组掩码
	46	[103:0]	{src_ip_2,dst_ip_2, protocol_2,src_port_2 , dst_port_2}	第 2 种类型报文的五元组
	47	[103:0]	mask_2	第 2 种类型报文的五元组掩码
	48	[103:0]	{src_ip_3,dst_ip_3, protocol_3,src_port_3 , dst_port_3}	第 3 种类型报文的五元组

模块	位置 (拍)	字段	信号名	含义
/	4~5	[127:0]	-	FAST 头
	49	[103:0]	mask_3	第 3 种类型报文的五元组掩码
	50	[103:0]	{src_ip_4,dst_ip_4, protocol_4,src_port_4 , dst_port_4}	第 4 种类型报文的五元组
	51	[103:0]	mask_4	第 4 种类型报文的五元组掩码
	52	[103:0]	{src_ip_5,dst_ip_5, protocol_5,src_port_5 , dst_port_5}	第 5 种类型报文的五元组
	53	[103:0]	mask_5	第 5 种类型报文的五元组掩码
	54	[103:0]	{src_ip_6,dst_ip_6, protocol_6,src_port_6 , dst_port_6}	第 6 种类型报文的五元组
	55	[103:0]	mask_6	第 6 种类型报文的五元组掩码
	56	[103:0]	{src_ip_7,dst_ip_7, protocol_7,src_port_7 , dst_port_7}	第 7 种类型报文的五元组
	57	[103:0]	mask_7	第 7 种类型报文的五元组掩码
	58	[103:0]	{src_ip_8,dst_ip_8, protocol_8,src_port_8 , dst_port_8}	第 8 种类型报文的五元组
	59	[103:0]	mask_8	第 8 种类型报文的五元组掩码
	60	保留		
	61	[15:0]	samp_freq	用于控制读取报文的频率

注：8 种类型的报文长度(字节数)不包含 2 拍 metadata 的长度。

附录 D 测试仪上报 Beacon 报文格式设计

测试仪会周期性上报本地状态信息给测试仪控制器，在配置与状态管理模块生成的测试仪上报 Beacon 报文格式如图 D-1 所示，该上

报 Beacon 报文的 TSMP 数据域划分如表 D-1 所示。

7bit		0	偏移量
FAST头			0~31
以太网帧头			32~47
TSMP 数据域	FAST头		48~79
	可配置 寄存器		80~927
	状态 寄存器		928~991

图 D-1 测试仪上报 Beacon 报文格式

表 D-1 测试仪上报 Beacon 报文的 TSMP 数据域划分

模块	位置 (拍)	字段	信号名	含义
PGM (CA)	6	[32]	test_stop	测试结束信号。 0: 测试开始; 1: 测试结束
		[31:0]	gcl_time_slot_cycle	门控列表的一个 $\frac{\text{时间槽大小}}{8}$
	7	[95:80]	tb3_size	第 3 种类型报文对应的令牌桶的桶深
		[79:64]	tb3_rate	每隔 1 个 slot 往第 3 种类型报文对应的令牌桶中添加的令牌数量
		[63:48]	tb2_size	第 2 种类型报文对应的令牌桶的桶深
		[47:32]	tb2_rate	每隔 1 个 slot 往第 2 种类型报文对应的令牌桶中添加的令牌数量
		[31:16]	tb1_size	第 1 种类型报文对应的令牌桶的桶深
		[15:0]	tb1_rate	每隔 1 个 slot 往第 1 种类型报文对应的令牌桶中添加的令牌数量
	8	[95:80]	tb6_size	第 6 种类型报文对应的令牌桶的桶深
		[79:64]	tb6_rate	每隔 1 个 slot 往第 6 种类型报文对应的令牌桶中添加的令牌数量
		[63:48]	tb5_size	第 5 种类型报文对应的令牌桶的桶深

模块	位置 (拍)	字段	信号名	含义
		[47:32]	tb5_rate	每隔 1 个 slot 往第 5 种类型报文对应的令牌桶中添加的令牌数量
		[31:16]	tb4_size	第 4 种类型报文对应的令牌桶的桶深
		[15:0]	tb4_rate	每隔 1 个 slot 往第 4 种类型报文对应的令牌桶中添加的令牌数量
	9	[63:48]	tb8_size	第 8 种类型报文对应的令牌桶的桶深
		[47:32]	tb8_rate	每隔 1 个 slot 往第 8 种类型报文对应的令牌桶中添加的令牌数量
		[31:16]	tb7_size	第 7 种类型报文对应的令牌桶的桶深
		[15:0]	tb7_rate	每隔 1 个 slot 往第 7 种类型报文对应的令牌桶中添加的令牌数量
	10	[127:112]	pkt_8_len	第 8 种类型报文的字节数 (包括 4B 的 CRC)
		[111:96]	pkt_7_len	第 7 种类型报文的字节数 (包括 4B 的 CRC)
		[95:80]	pkt_6_len	第 6 种类型报文的字节数 (包括 4B 的 CRC)
		[79:64]	pkt_5_len	第 5 种类型报文的字节数 (包括 4B 的 CRC)
		[63:48]	pkt_4_len	第 4 种类型报文的字节数 (包括 4B 的 CRC)
		[47:32]	pkt_3_len	第 3 种类型报文的字节数 (包括 4B 的 CRC)
		[31:16]	pkt_2_len	第 2 种类型报文的字节数 (包括 4B 的 CRC)
		[15:0]	pkt_1_len	第 1 种类型报文的字节数 (包括 4B 的 CRC)
	11	保留		
FSM (CA)	12	[103:0]	{src_ip_1,dst_ip_1, protocol_1, src_port_1, dst_port_1}	第 1 种类型报文的五元组
	13	[103:0]	mask_1	第 1 种类型报文的五元组掩

模块	位置 (拍)	字段	信号名	含义
				码
	14	[103:0]	{src_ip_2,dst_ip_2, protocol_2, src_port_2, dst_port_2}	第 2 种类型报文的五元组
	15	[103:0]	mask_2	第 2 种类型报文的五元组掩码
	16	[103:0]	{src_ip_3,dst_ip_3, protocol_3, src_port_3, dst_port_3}	第 3 种类型报文的五元组
	17	[103:0]	mask_3	第 3 种类型报文的五元组掩码
	18	[103:0]	{src_ip_4,dst_ip_4, protocol_4, src_port_4, dst_port_4}	第 4 种类型报文的五元组
	19	[103:0]	mask_4	第 4 种类型报文的五元组掩码
	20	[103:0]	{src_ip_5,dst_ip_5, protocol_5, src_port_5, dst_port_5}	第 5 种类型报文的五元组
	21	[103:0]	mask_5	第 5 种类型报文的五元组掩码
	22	[103:0]	{src_ip_6,dst_ip_6, protocol_6, src_port_6, dst_port_6}	第 6 种类型报文的五元组
	23	[103:0]	mask_6	第 6 种类型报文的五元组掩码
	24	[103:0]	{src_ip_7,dst_ip_7, protocol_7, src_port_7, dst_port_7}	第 7 种类型报文的五元组
	25	[103:0]	mask_7	第 7 种类型报文的五元组掩码
	26	[103:0]	{src_ip_8,dst_ip_8, protocol_8, src_port_8, dst_port_8}	第 8 种类型报文的五元组

模块	位置 (拍)	字段	信号名	含义
			8, protocol_8, src_port_8, dst_port_8}	
	27	[103:0]	mask_8	第 8 种类型报文的五元组掩码
	28	保留		
SSM (CA)	29	[15:0]	samp_freq	用于控制读取报文的频率
	30	保留		
PGM (SA)	31	[127:96]	pgm_pkt_4_cnt	第 4 种类型报文的发送个数
		[95:64]	pgm_pkt_3_cnt	第 3 种类型报文的发送个数
		[63:32]	pgm_pkt_2_cnt	第 2 种类型报文的发送个数
		[31:0]	pgm_pkt_1_cnt	第 1 种类型报文的发送个数
	32	[127:96]	pgm_pkt_8_cnt	第 8 种类型报文的发送个数
		[95:64]	pgm_pkt_7_cnt	第 7 种类型报文的发送个数
		[63:32]	pgm_pkt_6_cnt	第 6 种类型报文的发送个数
		[31:0]	pgm_pkt_5_cnt	第 5 种类型报文的发送个数
	33	保留		
FSM (SA)	34	[127:96]	ssm_pkt_4_cnt	接收第 4 种类型报文个数
		[95:64]	ssm_pkt_3_cnt	接收第 3 种类型报文个数
		[63:32]	ssm_pkt_2_cnt	接收第 2 种类型报文个数
		[31:0]	ssm_pkt_1_cnt	接收第 1 种类型报文个数
	35	[127:96]	ssm_pkt_8_cnt	接收第 8 种类型报文个数
		[95:64]	ssm_pkt_7_cnt	接收第 7 种类型报文个数
		[63:32]	ssm_pkt_6_cnt	接收第 6 种类型报文个数
		[31:0]	ssm_pkt_5_cnt	接收第 5 种类型报文个数
	36	保留		
SSM (SA)	37	[31:0]	pkt_cnt	接收的报文个数

注：

PGM 模块在报文（不包括两拍 metadata）的第四拍[47:0]打上发送时间戳。

被封装的 FAST 头的长度字段 metadata0[107:96]不包含在 FPGA OS 加的 2 拍 FAST 头长度和以太网头的长度。

优先级：第 1 种类型报文>第 2 种类型报文>...>第 8 种类型报文。

每一拍门控列表数据[127:120]、...、[7:0]分别对应第 16 个 slot、...、第 1 个 slot。

单位时间报文的最大发送 / 接收个数

$$= \frac{1\text{Gbit}}{(\text{最小报文长度 } 64\text{B} + \text{以太网最小帧间距 } 12\text{B} + \text{以太网帧前导码 } 7\text{B} + \text{帧开始符 } 1\text{B}) * 8} = 1.488 * 10^6 \text{个};$$

1h 报文的最大发送/接收个数 = $1.488 * 10^6 * 3600 = 5.357 * 10^9$ 个。

其中 $2^{16} = 65536$, $2^{32} = 4.3 * 10^9$ 。

软件配置的 slot 数值为 $\frac{\text{时间槽大小}}{8}$; 时间槽最大取 $200\mu\text{s}$ 。

往令牌桶添加令牌的速率与时间槽的关系: 每隔一个时间槽往令牌桶中加一次令牌, 一个令牌代表报文 1B, 单位时间槽往令牌桶中增加令牌数

$$\text{tb_rate} = \frac{\frac{\text{需限定的速率}(\text{bps})}{\frac{8\text{bit}}{1\text{B}}}}{\frac{10^9\text{ns}}{1\text{s}}} * \frac{\text{时间槽大小}(\text{ns})}{1\text{s}} = \frac{\text{需限定的速率}(\text{bps}) * \text{时间槽大小}(\text{ns})}{8 * 10^9}$$

tb_rate 的位宽: 设定时间槽最大取 $200\mu\text{s}$, 若要支持报文以满速率 1Gbps 发送, 则单位时间槽加的令牌数

$$\text{tb_rate} = \frac{1024^3 * 200_000}{8 * 10^9} = 26844 \text{个}$$

而 $2^{16} = 65536$, 所以 tb_rate 选择 16 位的位宽。

附录 E 基于以太网连接的 FAST 分组传输格式

在 FAST 2.0 中的 FAST APP 运行在本地, 通过 PCIe 总线与 FPGA OS 连接的, 而 TSN 测试仪是纯 FPGA 设计, 在远程 Linux 主机上运行 FAST APP, 所以需要重新设计 FAST lib, 同时定义通过以太网传输的 FAST 分组的格式。如下图 E-1 所示。

- 1) FAST lib 提供给 APP 的编程接口 API 保持不变;
- 2) FAST 分组通过以太网传输时, 需要封装到新的以太网帧中;
- 3) FPGA OS 收到 FAST 分组时, 除了去掉 CRC 外, 还要在送给 P3-rx 接口前, 再增加一个 FAST 头;

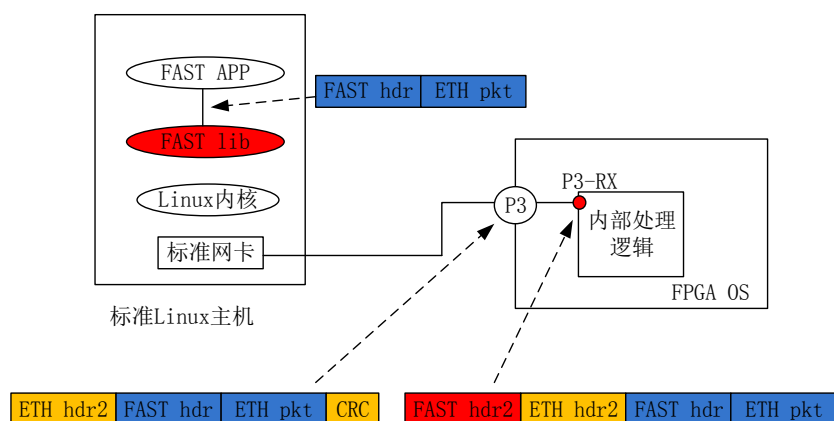


图 E-1 基于以太网连接的 FAST 分组传输格式

ETH hdr2 的定义为:

目的 MAC: 0xfffffffffff

源 MAC: 不关心

长度类型域: 0xff01

TSN 测试仪内部处理逻辑通过 P3-TX 向外部主机 FAST APP 发送分组时, 也遵循上述格式。

TSN 测试仪的 P3 端口默认为连接外部测试仪控制器的接口, 在 TSN 测试仪内部处理逻辑, 需要对进出 P3 端口的 FAST 分组进行封装和解封装处理。

附录 F TSN 测试仪测试连接图

TSN 测试仪测试连接图如图 F-1 所示。TSN 测试仪控制器发送 Beacon 配置报文从 3 号接口进入 TSN 测试仪; TSN 测试仪生成的 Beacon 上报报文从 3 号接口输出给 TSN 测试仪 Insight; TSN 测试仪生成测试报文从 1 号接口输出到被测网络, 经过被测网络后从 2 号接口回到 TSN 测试仪; TSN 测试仪对回来的测试报文进行封装采样后,

从 3 号接口输出给 TSN 测试仪 Insight；TSN 测试仪的 0 号接口接收从被测网络传来的时钟同步配置报文、PTP 报文和 PTP 封装报文，并将 PTP 报文和 PTP 封装报文从 0 号接口输出给被测网络。

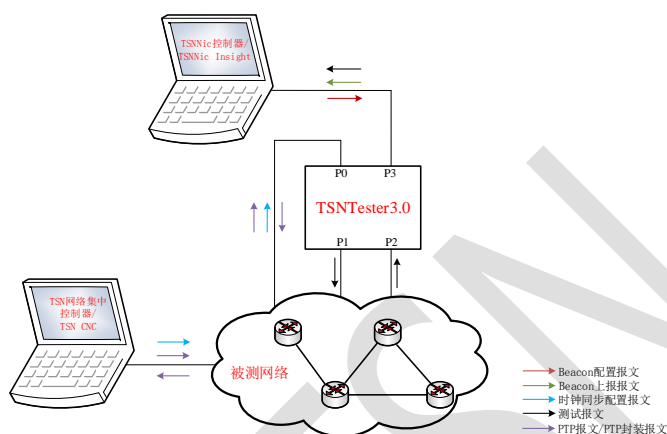


图 F-1 TSN 测试仪测试连接图

附录 G TSN 测试仪性能

用商用测试仪 Ixia 测试 TSN 测试仪发送带宽。

测试场景：用 TSN 测试仪发包，报文长度 512B（包括 4B 的 CRC），用 Ixia 测 TSN 测试仪

的实际发送带宽。Ixia 显示的速率值波动很小，每次测试时取三组数据求平均值得到实际发送带宽。测得的数据如表 G-1 所示。

表 G-1 TSN 测试仪带宽测试数据

TSN 测试仪理论发送带宽 (bps)	用 Ixia 测得的实际发送带宽 (bps)	差值(bps)
200,000,000	200,000,648	648
400,000,000	400,009,503	9,503
600,000,000	600,000,072	72
800,000,000	800,008,197	8,197

数据分析：由差值一览可得：TSN 测试仪理论发送带宽与用 Ixia

测得的实际发送

带宽相差小于 10,000bps。

用商用测试仪 Ixia 测试 TSN 测试仪最大发送带宽和吞吐量，并与 Ixia 做比较。

测试场景：

TSN 测试仪发包，用 Ixia 来测试 TSN 测试仪在发送不同报文长度（包括 4B 的 CRC）时的最大带宽和吞吐量；Ixia 显示的值波动很小，每次测试时取三组数据求平均值得到最大带宽和吞吐量；

商用测试仪 Ixia 自己发包，回环测试 Ixia 的最大发送带宽和吞吐量；测得的数据如表 G-2 和表 G-3 所示。

表 G-2 TSN 测试仪和 Ixia 的最大发送带宽比较

最大发送带宽 (bps)	TSN 测试仪	Ixia	差值(bps)
64B	761,912,625	761,905,402	7,223
128B	864,873,619	864,864,028	9,591
256B	927,545,901	927,537,389	8,512
512B	962,415,725	962,406,107	9,618
1518B	987,010,570	987,007,541	3,029

表 G-3 TSN 测试仪和 Ixia 的吞吐量比较

吞吐量(pps)	TSN 测试仪	Ixia	差值(pps)
64B	1,488,111	1,488,095	16
128B	844,603	844,594	9
256B	452,903	452,899	4
512B	234,965	234,964	1
1518B	81,275	81,273	2

数据分析：由差值一览可得：TSN 测试仪与 Ixia 的最大发送带宽相差小于 10,000bps；TSN 测试仪与 Ixia 的吞吐量相差小于 20pps。